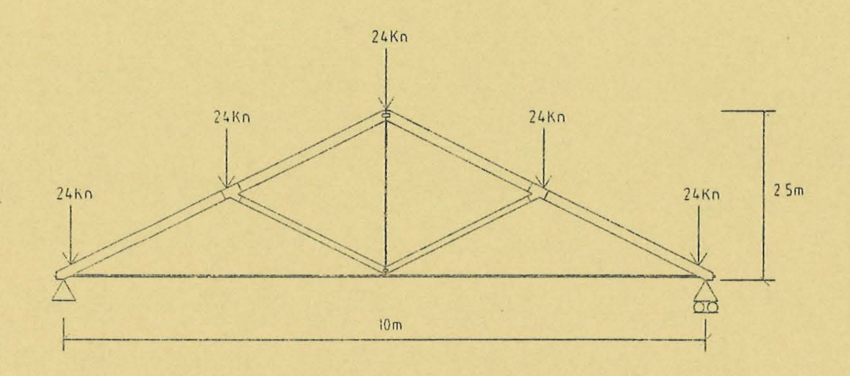
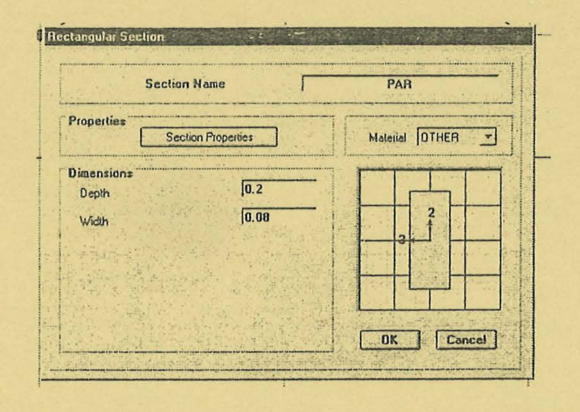
INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON *SAP2000* EDUCATIONAL

por

RAÚL GASCÓN MARTÍNEZ





CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON *SAP2000 EDUCATIONAL*

por

RAÚL GASCÓN MARTÍNEZ

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

Introducción al análisis de estructuras
con SAP2000 Educational

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Composición y maquetación: Daniel Álvarez Morcillo.
CUADERNO 62.01
ISBN: 84-95365-01-4
Depósito Legal: M-37813-1999

La enorme capacidad de cálculo de los ordenadores permite realizar en fracciones de segundo las operaciones necesarias para predecir el funcionamiento de una estructura previamente definida, lo que la convierte en una útil herramienta para comprobar y corregir el diseño de las estructuras.

El programa SAP es lo que llamamos un "programa abstracto", que no toma decisiones, se limita a calcular los movimientos y en consecuencia las tensiones de una estructura cuyos datos ha introducido el usuario, que en función de los resultados, puede comprobar la validez de una apuesta precisa, o ir corrigiendo los parámetros hasta obtener un diseño seguro y razonable.

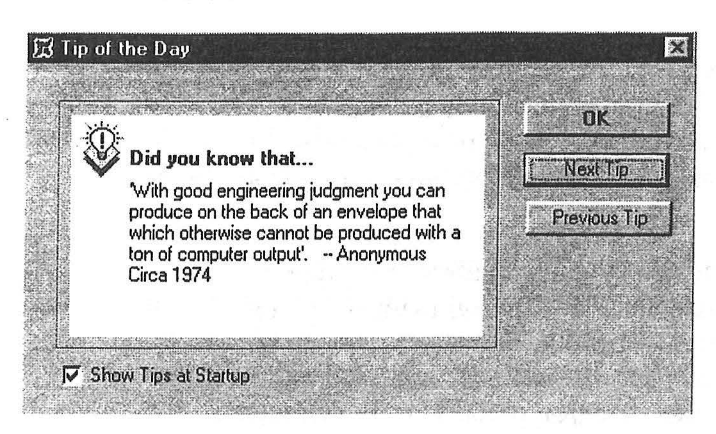
Si el estudio carece de conocimientos suficientes para aventurar un dimensionado, siquiera uno aproximado y para interpretar los resultados e introducir modificaciones en el sentido correcto, comprobará rápidamente que el ordenador es incapaz de remediar su ignorancia, pero aprenderá al menos, de una forma práctica, que un programa de ordenador sólo sirve para hacer más deprisa(y sin errores aritméticos, lo que no es poco), lo que uno ya sabía hacer.

Existen otros programas menos abstractos que suplen decisiones de diseño y cuyo uso es considerablemente más peligroso, ya que el resultado depende de unas decisiones genéricas que tomó en un momento el programador y que al no ser explícitas, tienen el riesgo de que el modelo que implican no sea completamente adecuado para representar la estructura que se trata de comprobar.

El presente cuaderno, cuyo autor es Raúl Gascón Martínez, explica con gran detalle el proceso, siempre costoso en términos de tiempo y atención, de introducción de datos e interpretación de resultados de uno de los programas abstractos de más fácil manejo y más transparente en cuanto a su funcionamiento interno y que puede ser una excelente herramienta para adquirir de forma rápida la experiencia que solo se adquiere después de analizar un número considerable de estructuras.

Ricardo Aroca Hernández-Ros

INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON SAP2000 Educational.



SAP2000 es un programa de análisis y diseño estructural basado en el método de elementos finitos. Su correcto uso lo convierte en una herramienta potente y de fácil manejo para el arquitecto en el diseño de una estructura.
La presente obra es una introducción al cálculo por ordenador dirigida a alumnos de 2° curso en la que llevaremos a cabo el análisis de tres estructuras isostáticas, de las que se ha realizado un dimensionado con los coeficientes de seguridad convencionales. Estas serán: una cercha de cubierta, una viga en celosía y una viga de alma llena.
Antes de entrar en el programa debemos disponer de un modelo que describa nuestra estructura. Esto significa que debe definirse en su totalidad, decidiendo, entre otros, el tipo de apoyo y tipo de unión entre barras, dimensionado, etc., de forma que nuestro modelo se asemeje lo más posible a la estructura real y podamos tomar como válidos los resultados obtenidos.
SAP2000 Educational está limitado a un máximo de 100 nudos pero dispone de toda la versatilidad de la versión profesional.

CERCHA DE CUBIERTA.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.

Materiales:

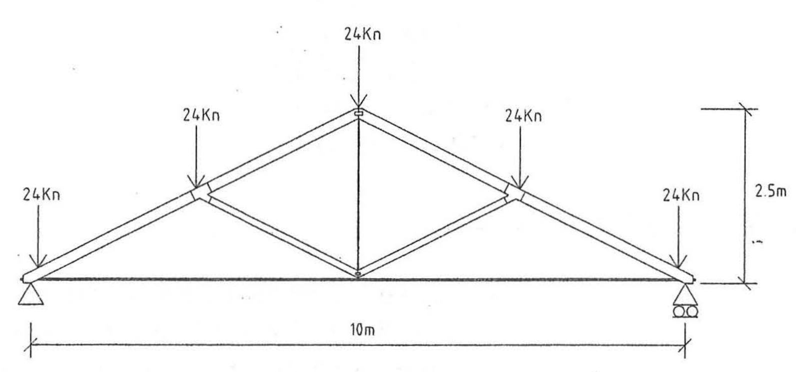
Madera: Tensión segura a compresión: 6000 KN/m^2
$E = 8 \times 10^6$ KN/m^2

Acero AEH 500: Tensión segura a tracción: 280000 KN/m^2
$E = 2.1 \times 10^8$ KN/m^2

Secciones:

Pares: 0.20m x 0.08m (canto por ancho)
Tornapuntas: 0.12m x 0.08m
Tirante: redondo de acero $\phi 20$
Pendolón: redondo de acero $\phi 12$

Apoyos, geometría y cargas como muestra la figura. Las uniones entre barras se consideran articuladas.



1. COMPROBAR CONFIGURACIÓN REGIONAL

Inicio
Configuración
Panel de control
Configuración regional
Número
Símbolo decimal (.)
Símbolo de separación de miles (,)

El correcto funcionamiento del programa exige configurar el símbolo decimal (.) y el símbolo de separación de miles (,). Del mismo modo debe trabajarse en KN y m como más adelante se especifica.

2. ENTRAR EN SAP2000 Educational.

Inicio
Programas
SAP2000 Educational

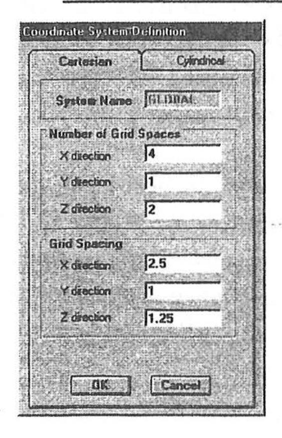
3. ELEGIR UNIDADES.

KN-m



La elección se realiza a través de una ventana desplegable situada en la parte inferior derecha de la pantalla.

4. CREAR ARCHIVO NUEVO.



Existen dos opciones para ello:
New model from template: Sirve para elegir un modelo preconcebido que puede ser modificado.
New model: Sirve para crear la red sobre la que definiremos la estructura.

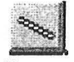
En nuestro caso:
File
New model
Cartesian
Number of grid spaces:
X direction 4
Y direction 1
Z direction 2
Grid spacing:
X direction 2.5
Y direction 1
Z direction 1.25

5. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA.



XZ 2D View

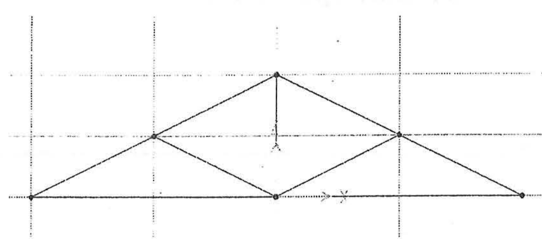
La red se usará como apoyo geométrico para la creación de la estructura. Para ello podemos cerrar una de las dos ventanas y situarnos en la otra en el plano xz.



Draw frame element

La estructura se modeliza como aparece en la figura mediante el comando *draw frame element* e indicando con el puntero del ratón el inicio y fin de cada barra.

Una orden se anula presionando *Esc.*



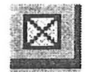
En nuestra pantalla debe aparecer un esquema de la estructura como el de la figura. En estructuras de pocos elementos el orden de creación de los mismos es poco relevante.
En otros casos puede ser necesario modificar la red o introducir más líneas. Esto se realiza mediante *draw / edit grid* y comprobando que *Draw / lock grid* está desactivado.
Edit / Delete borra las barras previamente seleccionadas con el puntero del ratón.

6. TIPO DE ENLACE ENTRE BARRAS.

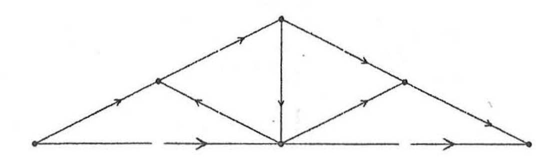


Select all
Assign
Frame
Releases
No Releases

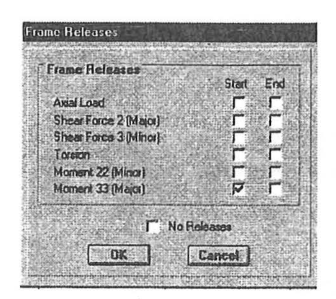
El proceso consiste en seleccionar la barra en cuestión con el puntero del ratón (se deselecciona de la misma manera) y asignar a sus extremos el tipo de enlace que precise para reproducir el de la estructura real.
Procederemos de la siguiente manera:
Primero seleccionaremos todas las barras y haremos unión rígida en sus extremos, es decir, *no releases,* para después introducir modificaciones en algunas de ellas.



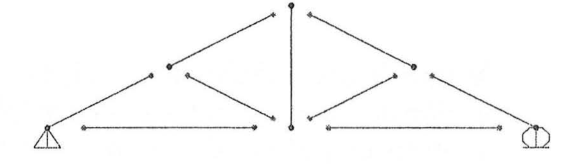
Set elements
Frames
Local axes



El principio y fin de cada barra depende del modo en que se ha procedido a definir las mismas y se describen mediante los ejes locales.



Assign (previa selección de la barra)
Frame
Releases



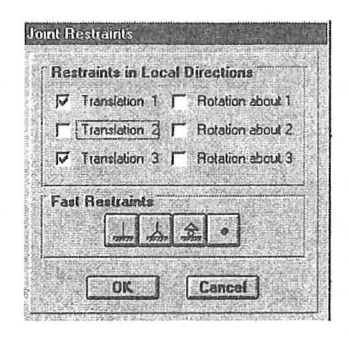
En la ventana como la que figura se marca aquel esfuerzo que se desea liberar.
A continuación liberamos *Moment 33* en los extremos de las barras que lo precisen hasta conseguir la configuración de la figura. En la misma ya se muestran los apoyos que posteriormente definiremos.

7. APOYOS.

Seleccionar nudo con puntero del ratón.



Assign joint restraints
Apoyo izquierdo:
Translation 1
Translation 3
Apoyo derecho:
Translation 3



8. DEFINICIÓN DEL MATERIAL.

Define
Materials
Steel
Modify/Show material
Modulus of elasticity 2.1e8
Other
Modify/Show material
Modulus of elasticity 8e6

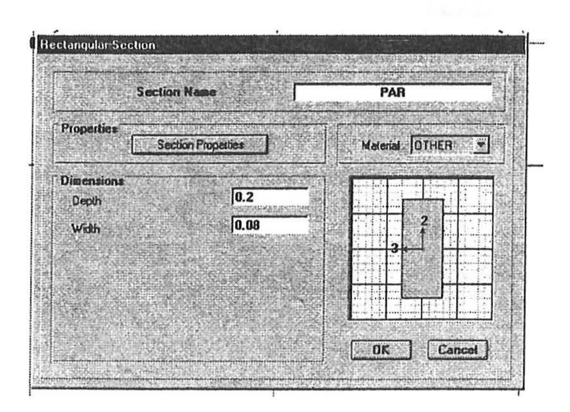
De las distintas propiedades del material sólo nos interesa en este caso el módulo de elasticidad.
La deformación final de la estructura dependerá de los giros relativos en nudos y de los alargamientos y acortamientos de las barras, hecho que depende del módulo de elasticidad del material.

9. SECCIONES.

Seleccionar barra con puntero del ratón.



Assign frame sections
Pares:
Add Rectangular
Modify/Show section
Depth 0.2
Width 0.08
Material other
Section name (nombrar sección)
Al salir de *frame sections* la sección habrá sido asignada a las barras previamente seleccionadas.



Repetimos el proceso:
Tirante:
Add circle
Modify/Show section
Diameter 0.02
Material steel
Section name

De igual manera definimos y asignamos la sección de las tornapuntas y del pendolón. También es posible definir primero todas las secciones y después asignarlas mediante *Define / Frame / Sections.*

10. CARGAS.

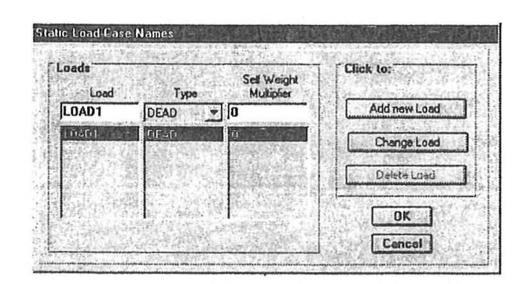
Define
Static load cases
Load 1 (nombre del estado de carga)
Type dead
Self weight multiplier 0
Change load

No consideramos el peso propio porque lo incluiremos en las cargas; si se desea hacerlo debe definirse el peso del material. El programa permite definir varios estados de carga (*static load cases*) lo cual resulta muy cómodo ya que podremos comparar distintos resultados sin más que abrir varias ventanas: *Options / Windows / Four.*

Seleccionamos los nudos de los pares.

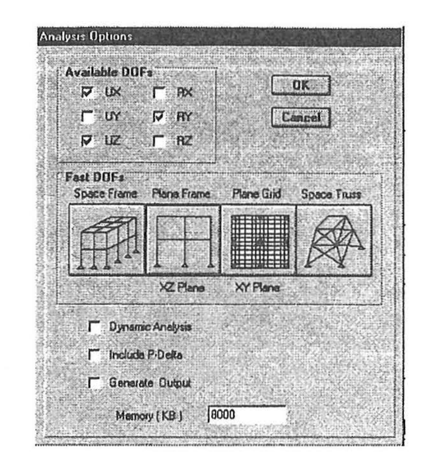


Assign joint loading
Force global z –24



11. ANÁLISIS.

Analyze
Set options
Plane Frame





run analysis

En nuestro caso el tipo de análisis será en el plano de la estructura donde los grados de libertad a tener en cuenta son los desplazamientos en x y en z y los giros en y.

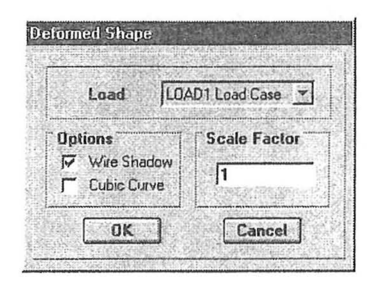
12. RESULTADOS.

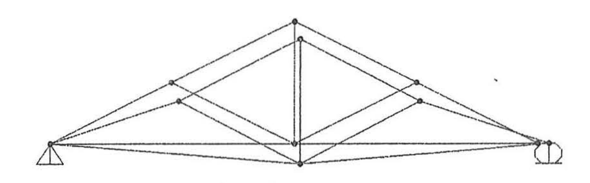
DEFORMADA:



Display Static Deformed Shape
LOAD1 Load Case
Wire Shadow

Pulsando el botón derecho del ratón sobre los nudos conoceremos los desplazamientos y giros producidos.





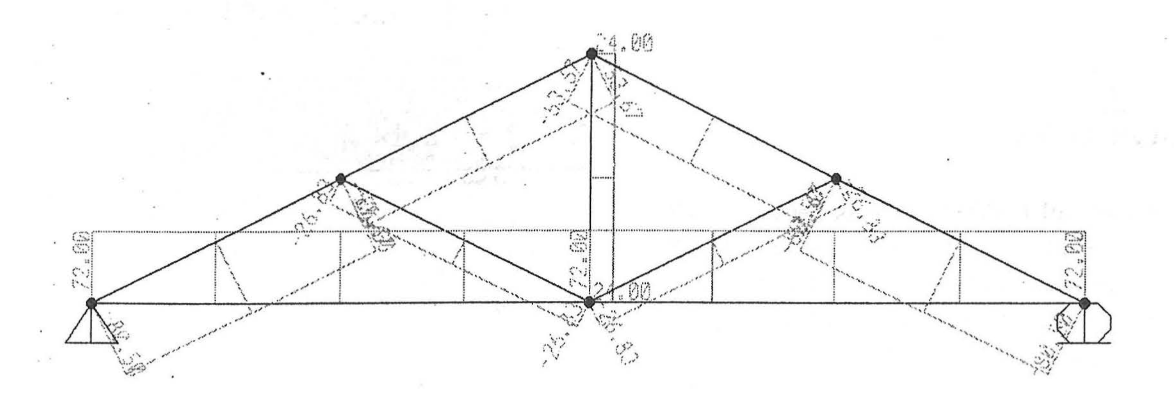
Flecha máxima: -0.01999m

DIAGRAMA DE ESFUERZOS AXILES:



Display Element Force/Stress Diagram
Frames
LOAD1 Load Case
Axial Force
Fill Diagram

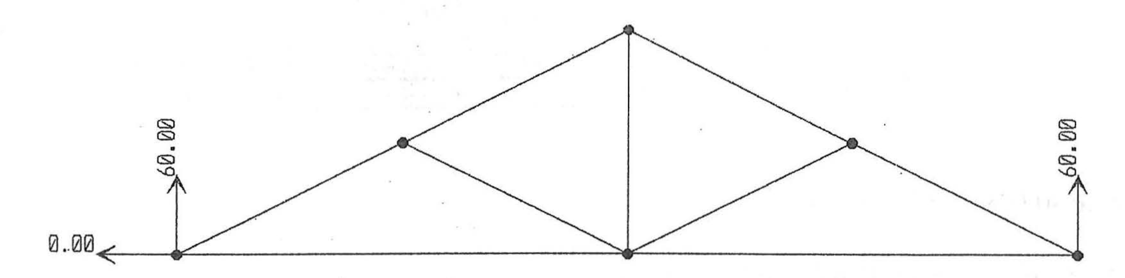
Observamos ahora el diagrama de esfuerzos axiles. Para conocer los valores de los mismos tenemos que pulsar el botón derecho del ratón sobre cada barra.
En este caso los valores son constantes para cada barra pero en otros, desplazando el cursor sobre el diagrama conoceremos el valor en cada punto.



También podemos ver los valores directamente en pantalla mediante *Display Element Force/Stress Diagram / Frames / LOAD1 Load Case / Axial Force / Show Values on Diagram.*

REACCIONES:

Display Element Force/Stress Diagram
Joints
LOAD1 Load Case
Reactions



Una vez realizado el análisis el modelo queda bloqueado y para introducir modificaciones debe pulsarse el icono:



Lock/Unlock Model
En todo momento puede obtenerse información del modelo pulsando con el botón derecho del ratón sobre un nudo o barra o mediante la ventana *Display* o también mediante el comando ya mencionado *Set Elements.*
Cuando se trabaja con estructuras tridimensionales será útil modificar el punto de vista mediante *View / Set 3D View.*

No merecen especial mención aquellos iconos comunes a los programas para windows así como los de control del zoom, de fácil manejo y a los que el usuario puede estar ya acostumbrado. En cualquier caso en los manuales de SAP2000 podemos encontrar la relación completa de iconos y su descripción en "Tutorial Manual", "Appendix A" y "Appendix B".
Para obtener información más detallada acerca de estos aspectos y otros se recomienda consultar los temas de ayuda del propio programa así como los manuales del mismo.
A continuación se exponen de forma abreviada los pasos a seguir para el análisis de una viga en celosía, y una viga de alma llena.

VIGA EN CELOSÍA.

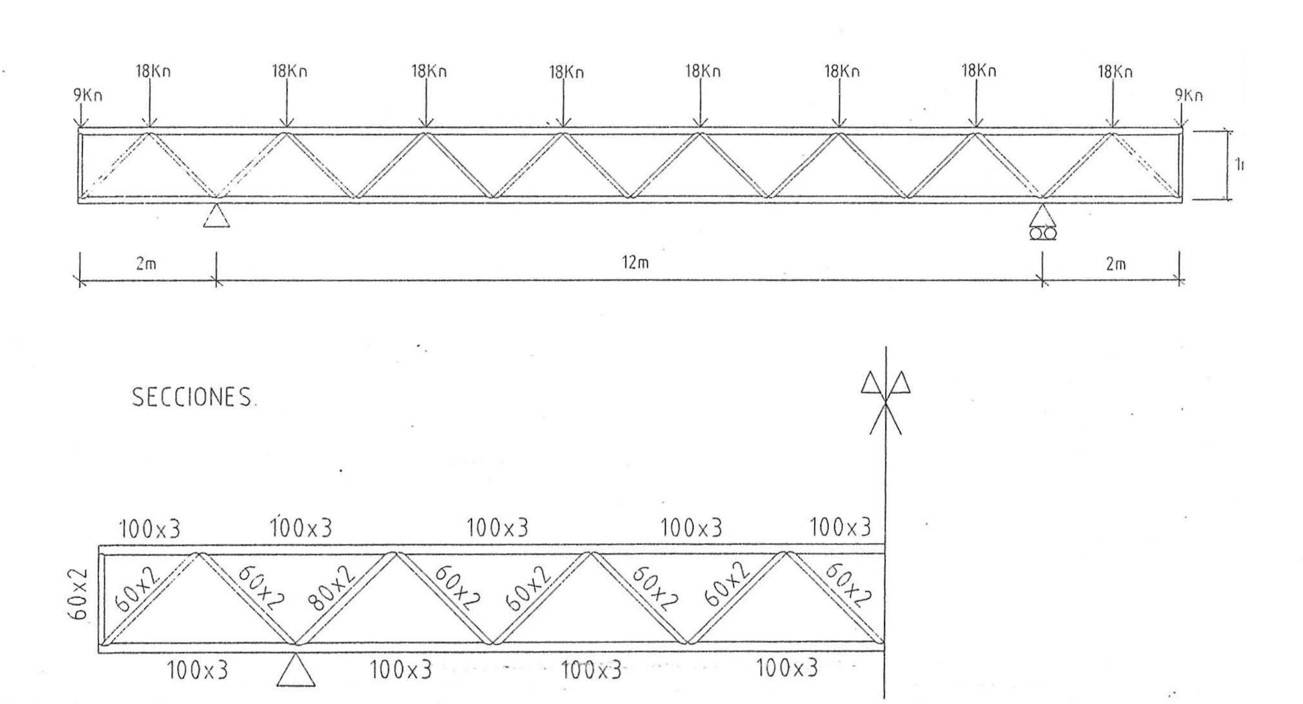
DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.

Materiales:

Acero laminado: Tensión segura: 180000 KN/m^2
$E = 2.1 \times 10^8$ KN/m^2

Secciones: Perfil hueco redondo en todas las barras de las dimensiones que aparecen en el esquema.

Apoyos, geometría y cargas como muestra la figura.



Tipo de unión entre las barras:
Actualmente se tiende a realizar las uniones de las diagonales con los cordones de forma directa, es decir, tubo contra tubo soldando todo el perímetro.
La estructura real es de nudos rígidos pero el modelo de articulaciones para el cálculo manual ofrece rapidez y suficiente precisión para hallar las solicitaciones.
El cálculo automático nos permite estudiar qué ocurre cuando los nudos son rígidos, algo que sería tedioso de calcular de forma manual, y comparar resultados según ambos modelos.
Como más adelante se verá habrá solicitaciones de momento y cortante en las barras. Estas solicitaciones se denominan de segundo orden y aparecen después y debido a la deformación de la estructura.
Sin embargo se suelen despreciar frente a los momentos flectores que aparecen en los nudos debido a la excentricidad de las barras que a ellos acometen y que sí son un factor a tener en cuenta en el diseño del nudo.

1. COMPROBAR CONFIGURACIÓN REGIONAL

Inicio
Configuración
Panel de control
Configuración regional
Número
Símbolo decimal (.)
Símbolo de separación de miles (,)

2. ENTRAR EN SAP2000 Educational.

Inicio
Programas
SAP2000 Educational

3. ELEGIR UNIDADES.

KN-m

4. CREAR ARCHIVO NUEVO.

File
New Model from Template
Sloped Truss
Gridlines
Number of Bays 8
Height of Truss 1
Truss Bay Length 2

De los iconos que aparecen en la ventana seleccionamos el de la esquina inferior izquierda denominado *Sloped Truss.*
Desactivamos la casilla *Restraints* ya que colocaremos los apoyos en otro lugar.

5. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA.

Draw Frame Element

Completamos el modelo colocando las barras que faltan.

6. TIPO DE ENLACE ENTRE BARRAS.

Select All
Assign
Frame
Releases
No Releases

7. APOYOS.

Assign joint restraints
Apoyo izquierdo:
Translation 1
Translation 3
Apoyo derecho:
Translation 3

8. DEFINICIÓN DEL MATERIAL.

Define
Materials
Steel
Modify/Show material
Modulus of elasticity 2.1e8

9. SECCIONES.

Para definir la sección de los cordones:
Define
Frame Sections
Add Pipe
Section name (nombrar sección)
Material Steel
Outside diameter 0.1
Wall Thickness 0.003
Para asignar una sección:
Seleccionamos las barras que tienen una misma sección.
Assign
Frame
Sections
Se selecciona la sección correspondiente.

De esta manera repetimos el proceso para definir el resto de secciones que posteriormente asignaremos a sus respectivas barras.

10. CARGAS.

Define
Static load cases
Load 1 (nombre del estado de carga)
Type dead
Self weight multiplier 0
Change load

Seleccionamos los nudos de los pares.
Assign joint loading
Force global z –18
En los nudos extremos colocamos mitad de carga.

11. ANÁLISIS.

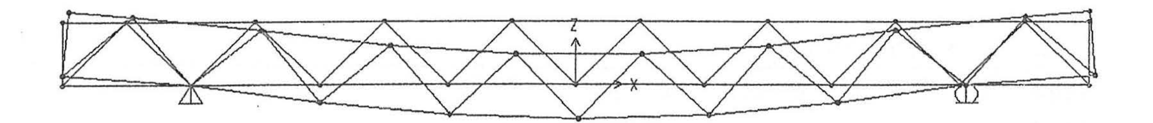
Analyze
Set options
Plane Frame (definimos el tipo de análisis)

run analysis

12. RESULTADOS.

DEFORMADA

Display Static Deformed Shape
LOAD1 Load Case
Wire Shadow



Flecha máxima:

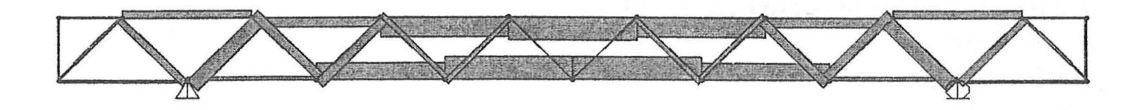
Joint Displacements

Joint ID 5

	X	Y	Z
Trans	0.00248	0.00000	-0.02496
Rotn	0.00000	0.00000	0.00000

DIAGRAMA DE ESFUERZOS AXILES:

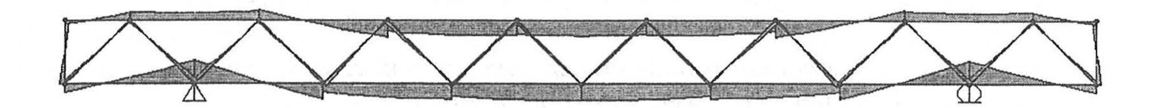
Display Element Force/Stress Diagram
Frames
LOAD1 Load Case
Axial Force
Fill Diagram



Solicitaciones máximas:
Cordones: 128.05 Kn
Diagonales: 77.03 Kn

DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES:

Display Element Force/Stress Diagram
Frames
LOAD1 Load Case
Moment 3-3
Fill Diagram



Solicitaciones máximas:
Cordones: 0.5769 mKn
Diagonales: 0.1098 mKn

Los esfuerzos cortantes (*shear 2-2*) son de escasa relevancia.

REACCIONES:

Display Element Force/Stress Diagram
Joints
LOAD1 Load Case
Reactions

Se recomienda consultar los temas de ayuda del propio programa en lo referente a la descripción del elemento barra en *Help / Search for Help on / FRAME Element* donde aparecen representados los ejes locales del elemento barra y su relación con los distintos esfuerzos.
Al estudiar la deformada el programa ofrece una animación provista también de sonido que se activa en la parte inferior derecha de la pantalla en *Start Animation* y que puede resultar interesante para describir los modos de vibración de una estructura en cálculo dinámico.
En estructuras simétricas geométricamente o en las que se repite cierto módulo o conjunto de elementos puede ser de utilidad, a la hora de definir la geometría de la estructura, el hacer simetrías especulares (*Edit / Replicate / Mirror*), o la repetición de elementos de forma lineal (*Edit / Replicate / Linear*) o también radial (*Edit / Replicate / Radial*).

VIGA DE ALMA LLENA.

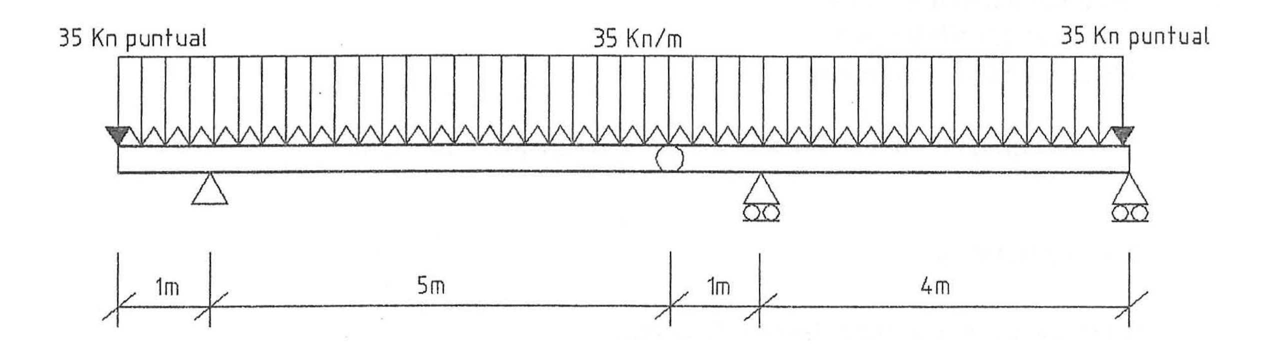
DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.

Materiales:

Acero laminado: Tensión segura: 180000 KN/m^2
E = 2.1 x 10^8 KN/m^2

Sección: IPE 300

Se trata de una viga continua que tiene una articulación cerca de uno de los apoyos (los empalmes de este tipo de vigas se suelen hacer a un cuarto o a un quinto de la luz, donde el momento flector tiene un valor menor o es cero, dependiendo además de cómo se realice la unión). De este modo reproducimos las circumstancias reales, suponiendo que la unión sólo es capaz de transmitir el cortante, pero no posee rigidez a momento.
Apoyos, geometría y cargas como indica la figura.



Recordamos que la presente versión de SAP2000 precisa la configuración del símbolo decimal y del símbolo de separación de miles como punto y coma respectivamente, así como el uso de Kn y m. También se advierte de que estas prescripciones no son extensibles a otras versiones educativas de SAP2000, refiriéndonos en todo momento a la de cien nudos.

1. CREAR ARCHIVO NUEVO.

File
New Model from Template
Beam
Gridlines
Number of Spans 2
Span Length 6

De los iconos que aparecen en la ventana seleccionamos el de la esquina superior izquierda denominado *Beam.*
Desactivamos la casilla *Restraints* ya que colocaremos los apoyos en otro lugar.

2. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA.

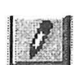
Draw
Edit Grid

Direction x
-7
Add Grid Line
-1.5
Add Grid Line
4
Add Grid Line

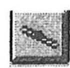
Modificamos la red para añadir nuevas lineas que nos servirán para definir la geometría de la estructura.
Debemos comprobar que *Lock Grid Lines* está desactivado.

All
Edit
Delete

Con ello borramos las dos barras que tenemos.



Refresh Window



Quick Draw Frame Element
Colocamos el puntero del ratón entre dos nodos de la red y pulsamos el botón izquierdo. Cuando necesitemos introducir discontinuidades o cargas puntuales en medio de una barra tendremos que definirla en dos, para poder concretar dicha discontinuidad o aplicar la carga puntual en el nudo que se conforma.

3. TIPO DE ENLACE ENTRE BARRAS.

Select All
Assign
Frame
Releases
No Releases

Después, seleccionamos una de las dos barras que limitan la articulación y liberamos, en el extremo donde se encuentra ésta, *Moment 3-3.* Con ello nos aseguramos de que no habrá transmisión de momentos (si fuera una articulación a la que acometiesen tres barras tendríamos que liberar *Moment 3-3* en dos de ellas, no importando cuales, si es que no hay más condicionantes).

4. APOYOS.

Assign joint restraints
Apoyo izquierdo:
Translation 1
Translation 3
Apoyo central y derecho:
Translation 3

5. DEFINICIÓN DEL MATERIAL.

Define
Materials

Steel
Modify/Show material
Modulus of elasticity 2.1e8

6. SECCIONES.

Define
Frame Sections
Add I
Section name (nombrar sección)
Material Steel
Outside height 0.3
Top flange width 0.15
Top flange thickness 0.0107
Web thickness 0.0071
Bottom flange width 0.15
Bottom flange thickness 0.0107

Para asignar la sección:
All
Assign
Frame
Sections
Se selecciona la sección correspondiente.

7. CARGAS.

Define
Static load cases
Load 1 (nombre del estado de carga)
Type dead
Self weight multiplier 0
Change load
Seleccionamos los nudos extremos.
Assign Joint Loading
Force Global z –35

All



Assign Frame Span Loading
Load Type and Direction:
Forces
Global Z
Uniform Load –35

8. ANÁLISIS.

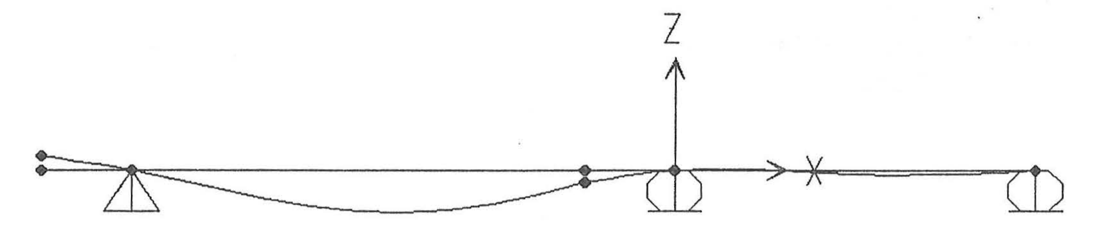
Analyze
Set options
Plane Frame (definimos el tipo de análisis)

run analysis

12. RESULTADOS.

DEFORMADA

Display Static Deformed Shape
LOAD1 Load Case
Wire Shadow



En este caso no podemos obtener la flecha máxima. Para ello debemos definir la viga con un mayor número de segmentos.

DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES:

Display Element Force/Stress Diagram
Frames
LOAD1 Load Case
Moment 3-3
Show Values on Diagram

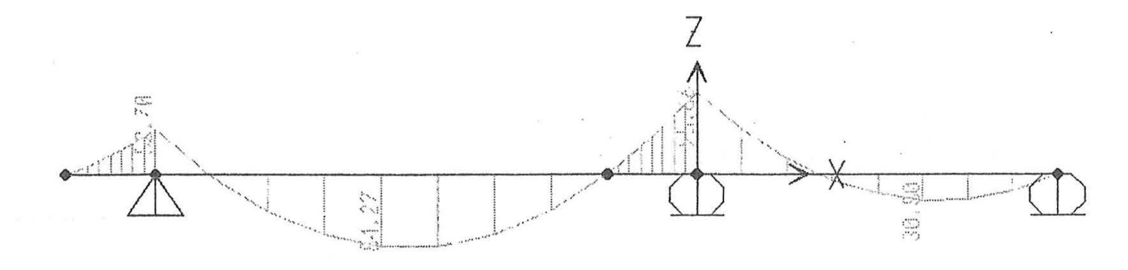
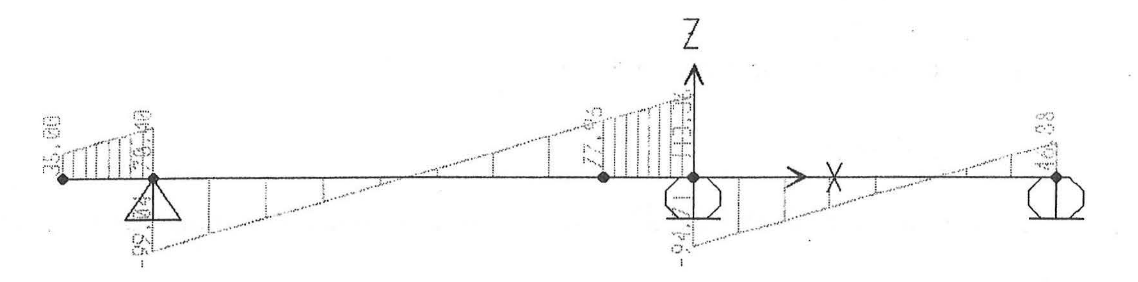


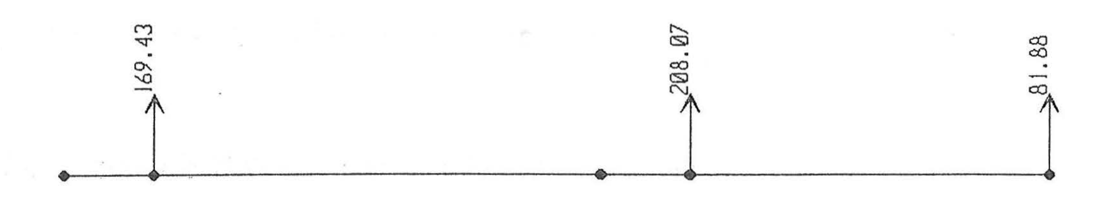
DIAGRAMA DE ESFUERZOS CORTANTES:
Display Element Force/Stress Diagram
Frames
LOAD1 Load Case
Shear 2-2

Show Values on Diagram



REACCIONES:

Display Element Force/Stress Diagram
Joints
LOAD1 Load Case
Reactions



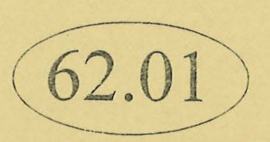
Como se observa la geometría puede definirse de múltiples formas siendo ésta sólo una de ellas. En el caso en que nos interese conocer la flecha, como suele ser habitual, no tendríamos más que dividir la viga en segmentos, de forma que podríamos hallarla con bastante exactitud. Esto lo realizaríamos mediante *Edit / Divide Frames* .
Este reducido "tutorial" no pretende ser más que una introducción al programa, pero muestra la potencia y facilidad de uso del mismo.
También posee interesantes aplicaciones para cálculo de elementos superficiales y cálculo dinámico cuya explicación puede quedar en el tintero para futuras ediciones.

Bibliografía:

Norma Básica de la Edificación:
AE/88
EA-95

Manuales del programa:
Getting Started
Tutorials
Steel Design

CUADERNO



CATÁLOGO Y PEDIDOS EN
http://www.aq.upm.es/of/jherrera
jherrera@aq.upm.es

